

ARQUITETURA DE CONTROLE DO EXOSQUELETO ORTOPÉDICO ORTHOLEG 2.0

Vanessa Gabriela de Souza Moraes, UFRN, 2010vanessa@ufrn.edu.br
Kassio Janielson da Silva Eugenio, UFRN, kjseugenio@hotmail.com
Pablo Javier Alsina, UFRN, pablo@dca.ufrn.br
Márcio Valério de Araújo, UFRN, marcio@ct.ufrn.br
Adelardo Adelino Dantas de Medeiros, UFRN, adelardo@dca.ufrn.br
Carlos Eduardo Trabuco Dorea, UFRN, cetdorea@dca.ufrn.br

Resumo. Os exoesqueletos ortopédicos são dispositivos robóticos destinados a pessoas com perda total ou parcial dos movimentos, no entanto dependendo da arquitetura de controle implementada, o controle de trajetórias destes dispositivos poderá implicar na impossibilidade de manter o controle de posição. Desta forma, faz-se necessário desenvolver uma arquitetura de controle aberta, modular e que forneça ações autônomas sem a interação constante do usuário, de maneira que os exoesqueletos consigam executar uma trajetória mais antropomórfica e personalizada para cada usuário. Portanto, este trabalho tem como objetivo apresentar a arquitetura de controle do exoesqueleto ortopédico Ortholeg 2.0, nesta arquitetura foi utilizado um sistema de visão para identificar características do ambiente, o planejador de trajetórias para gerar sequências de passos adaptados e um sistema de controle para o acionamento dos atuadores elétricos.

Palavras chave: exoesqueleto, arquitetura, controle.

1. INTRODUÇÃO

Uma arquitetura de controle é baseada na organização de estratégias bem definidas e divididas em dois módulos, arquitetura de hardware e arquitetura de software. Esta arquitetura de controle permite que um sistema robótico atue em um determinado ambiente, utilizando-se dos recursos físicos e computacionais da mesma. Desta forma, o sistema robótico deverá reproduzir as tarefas pré definidas de maneira mais estável e eficaz.

Com base nisto, a criação de uma arquitetura de controle é essencial para o desenvolvimento de robôs bípedes mais complexos, como por exemplo: os exoesqueletos ortopédicos, pois para estes dispositivos é necessário a implementação de um controle específico, com o objetivo de reproduzir e executar trajetórias antropomórficas de maneira mais fiel possível, antropomórfica e personalizada para cada usuário.

Foi desenvolvido uma arquitetura de controle e implementada no exoesqueleto ortopédico, denominado Ortholeg 1.0. Esta arquitetura consiste em uma arquitetura fechada e não modular, o que implica na impossibilidade de aplicar controles de trajetórias em taxas adequadas. Com isto, o controle de trajetória não é realizado de forma adequada, pois a arquitetura não permite fazer o controle de posição solicitado pelo usuário.

Contudo, com o objetivo de desenvolver um exoesqueleto transparente, ou seja, um exoesqueleto que a própria arquitetura de controle, forneça algumas ações autônomas sem a interação constante do usuário, um ponto importante a ser considerado para a transparência é que o exoesqueleto consiga reproduzir trajetórias antropomórficas e personalizadas para cada usuário, de maneira mais fiel possível.

Como a arquitetura implementada no exoesqueleto Ortholeg 1.0 consiste em uma arquitetura fechada, não permitindo definir os controladores de posição e de trajetória de forma adequada, com o objetivo de seguir as referências antropomórficas personalizadas, este trabalho apresenta uma nova arquitetura de controle aberta, modular e transparente, desenvolvida e implementada no exoesqueleto Ortholeg 2.0.

2. Exoesqueleto ortopédico Ortholeg 2.0

O exoesqueleto Ortholeg 2.0 é um protótipo de um exoesqueleto ortopédico com atuação nos membros inferiores, que tem como objetivo auxiliar as pessoas com perda parcial ou total dos movimentos nos membros inferiores. O protótipo Ortholeg 2.0 é baseado no conceito de transparência, cujo objetivo é fazer com que o exoesqueleto ortopédico seja o menos perceptível possível, tanto para o usuário, como para as pessoas ao redor. Por isso, a estrutura mecânica do exoesqueleto é quase todo constituída por tubos de alumínio unidos por juntas rotacionais nas articulações do quadril e

do joelho. Cada articulação possui um grau de liberdade, que possibilita realizar os movimentos de extensão e flexão em ambas as juntas (Araújo, 2009). As juntas rotacionais são fabricadas com o alumínio 7075, acionadas por motores elétricos CC de 150W. Para fixar o usuário ao exoesqueleto, são utilizados alguns prendedores feitos de copolímero na região das coxas e panturrilha, além de um suporte na região lombar feito de material termoplástico acrílico. A Figura 1 apresenta o exoesqueleto ortopédico Ortholeg 2.0.

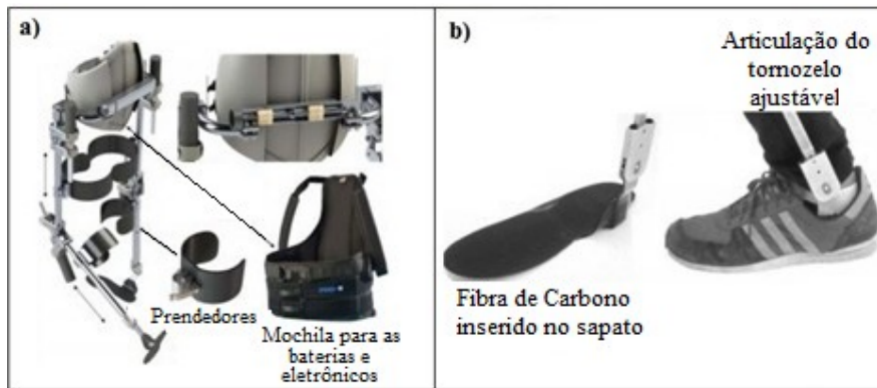


Figure 1. Exoesqueleto Ortholeg 2.0 a) Estrutura mecânica. b) Articulação do calcanhar. (Gloger, 2015)

Para o acionamento do exoesqueleto Ortholeg, o protótipo possui um sistema eletrônico embarcado constituído por um computador embarcado (Raspberry® Pi 2) responsável por executar um planejador de caminhada, processar dados de alto nível e permitir a interação com o usuário através da Interface Homem-Máquina (IHM). Também consta com um microcontrolador modelo Arduino® Mega 2560 para realizar as leituras de sensores e controlar o movimento das juntas. Para a acionamento das juntas, utiliza-se uma placa de acionamento de potência (T'REX controller) (Eugenio, 2016).

3. Arquitetura de controle

A partir da arquitetura de controle desenvolvida e implementada no exoesqueleto Ortholeg 2.0, é incorporado ao exoesqueleto um certo grau de autonomia, que se adapte ao ambiente através das informações obtidas pelo o sistema de visão. Desta maneira, a arquitetura poderá planejar os passos e sintetizar os movimentos personalizados para cada usuário em particular.

O sistema de visão é responsável em construir um mapa local do ambiente, detectando algumas características importantes, como por exemplo: superfícies planas, superfícies irregulares e obstáculos. Com essas informações, o planejador de trajetória gera uma sequência de passos adaptados para cada característica do ambiente. Para executar essa sequência de passos de forma mais transparente possível, faz-se necessário que os movimentos do exoesqueleto sejam realizados o mais antropomórfico e personalizado para cada usuário. A Figura 2 é apresentada a arquitetura de controle do exoesqueleto ortopédico Ortholeg 2.0.

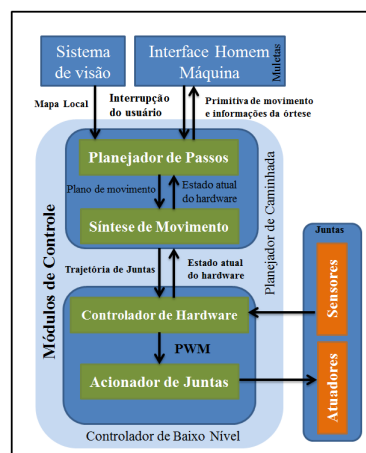


Figure 2. Arquitetura de controle do exoesqueleto ortopédico 2.0 (Eugenio, 2016)

Com as informações obtidas pelo o sistema de visão e gerada a sequência de passos adaptados pelo planejador de

trajetórias, são enviados ao sistema de controle para o acionamento dos atuadores elétricos das articulações do quadril e do joelho.

3.1 Planejador de trajetória

3.1.1 Planejador de passos

O módulo planejador de passos tem como objetivo controlar e executar o movimento do exoesqueleto de acordo com as características biométricas do usuário. Para tal, o usuário do exoesqueleto seleciona o movimento de caminhada com o ciclo de marcha personalizado através do módulo IHM. Segundo Moraes (2015), "Dependendo do percurso, o tamanho do passo adotado inicialmente poderá implicar em dificuldades para finalizar o trajeto. Logo, para o exoesqueleto executar o movimento de caminhar sem perder a naturalidade da marcha humana, se faz necessário variar o tamanho do passo (S) para adequar as condições impostas pelo o ambiente". Com base nesta afirmação, foram realizados experimentos com pessoas saudáveis utilizando a técnica da cinemetria externa (SILVEIRA ET AL, 2006) para observar o comportamento da marcha humana.

De acordo com o comportamento observado, Moraes(2015) afirma que,"a marcha humana é dividida em três fases: fase inicial que corresponde ao primeiro passo; a fase constante que é determinada pela parcela da trajetória com tamanho de passos constantes e a fase final que refere-se aos três últimos passos variados para finalizar o percurso voltando a posição ortostática". Portanto, foi desenvolvido um algoritmo planejador de passos, o que possibilitou o exoesqueleto Ortholeg ajustar o tamanho do passo ao final do percurso de forma autônoma. A Figura 3 mostra o comportamento gerado pelo algoritmo planejador de passos, onde é possível observar as três regiões, Passo inicial, tamanho de passo constante e tamanho de passo variável, o que é possível observar o comportamento aproximado ao da marcha humana.

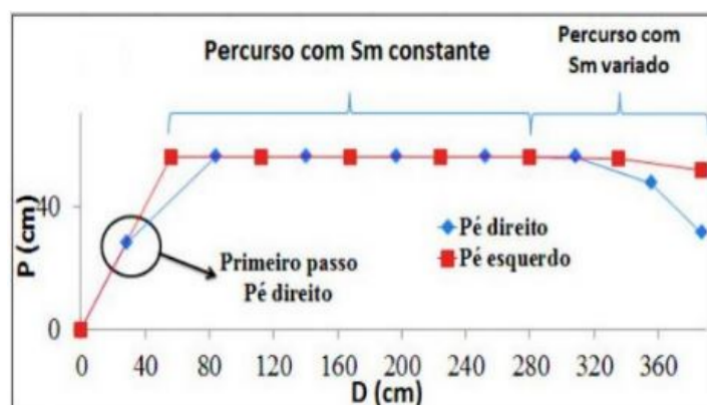


Figure 3. Comportamento gerado pelo planejador de passos (V.G.S.Moraes, 2015)

3.1.2 Geração de marcha adaptável

O módulo de geração de marcha adaptável ou antropomórfica, faz com que o movimento do exoesqueleto Ortholeg seja semelhante ao comportamento da caminhada de seres humanos saudáveis. Para isso, foi utilizado o método PCA (Principal Component Analysis) que tem a capacidade de separar os diferentes comportamentos de marcha humana encontrados em um conjunto de dados e, posteriormente, os dados foram utilizados para gerar referências de junta a serem executadas pelo exoesqueleto de forma a reproduzir as peculiaridades do usuário (N. d. B. Melo, 2015).

O modelo (N. d. B. Melo, 2015) foi construído a partir de trajetórias de ângulos de juntas e outras informações do usuário, tais como: peso, altura, idade, etc. A Figura 4 apresenta uma comparação dos ciclos de marchas, onde a marcha original é capturada de um usuário saudável, a marcha de reprojeção é o resultado da geração de referência angular personalizada para a junta do quadril usando o método proposto e a marcha padrão que é utilizado na maioria dos exoesqueletos comerciais, que consiste na média de ciclos de marcha de uma amostra representativa da população.

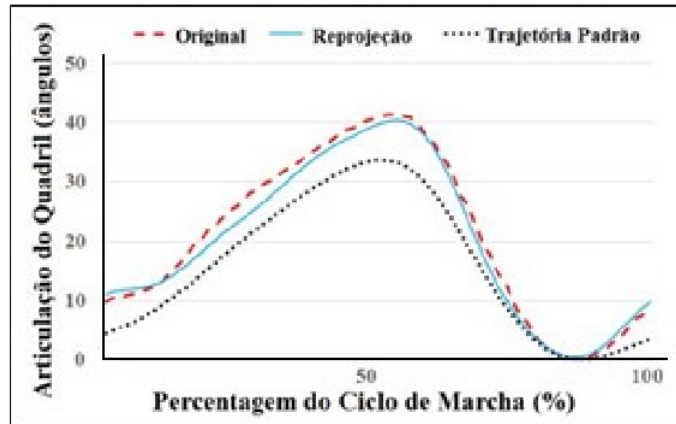


Figure 4. Resultados de síntese de trajetória personalizada (Melo, 2017).

3.2 Controlador PID

O controlador implementado na arquitetura de controle foi do tipo PID (Proporcional, Integral e Derivativo), por ser de simples implementação e capaz de exercer um desempenho adequado quando sintonizado corretamente, pois possibilita alcançar a resposta especificada para o sistema garantindo um controle estável e preciso.

A fim de que o sistema apresente as propriedades desejadas, se faz necessário ajustar os valores dos ganhos K_p , K_i e K_d das ações P, I e D, apresentadas nas Eq. 1, 2 e 3 respectivamente, as quais foram implementadas no controlador PID.

$$P = K_p \times e(t) \quad (1)$$

$$I = K_i \times \int_0^t e(\tau) d(\tau) \rightarrow \frac{K_p}{\tau_i} \times \int_0^t e(\tau) d(\tau) \quad (2)$$

$$D = K_d \times \frac{de(\tau)}{d(\tau)} \quad (3)$$

Para o ajuste dos ganhos K_p , K_i e K_d , é necessário utilizar um método de sintonização para determinar os valores mais precisos dos ganhos do controle PID.

Um dos métodos mais utilizado consiste no método Ziegler-Nichols (Ogata, 2010), pois é fundamental para os sistemas que não dispõem de modelos matemáticos. Este método consiste em determinar o valor do ganho proporcional através de um valor de ganho crítico (K_{cr}), em que o sistema em malha fechada entra em período de oscilação, conhecido como período crítico (P_{cr}). Onde é atribuído valor nulo aos ganhos K_i e K_d e o ganho K_p é aumentado até que o sistema entre em oscilação. Ao entrar em oscilação são anotados os valores K_{cr} e P_{cr} . A Tab. 1 mostra a regra de sintonia dos ganhos baseado em K_{cr} e P_{cr} .

Table 1. Regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada em K_{cr} e P_{cr} .

Tipo de controlador	K_p	τ_i	τ_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{0.5P_{cr}}{1.2}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

4. Resultados

Como a arquitetura de controle do exoesqueleto Ortholeg 1.0 é uma arquitetura fechada e não modular, não foi possível aplicar controles de trajetórias em taxas adequadas, o que implicou em uma defasagem entre as referências utilizadas num ciclo de marcha com as referências geradas pela arquitetura de controle. A Figura 5a, apresenta o resultado gerado num ciclo de marcha para a articulação do quadril.

No entanto, a arquitetura desenvolvida e implementada no exoesqueleto Ortholeg 2.0, possibilitou obter um controle de trajetória em taxas adequadas, gerar referências adaptadas para cada característica do ambiente e referências personalizadas para cada usuário, realizando uma marcha mais antropomórfica possível, antropomórfica e personalizada para cada usuário. A Figura 5b apresenta o resultado gerado em um mesmo ciclo de marcha para a articulação do quadril.

Mediante o mapa construído pelo o sistema de visão, foi possível obter características específicas de cada ambiente em particular. As informações coletadas foram enviadas ao planejador de trajetórias, para gerar uma sequência de passos adaptados ao respectivo ambiente. Contudo, para o controle da trajetória, esta sequência foi enviada ao sistema de controle para o acionamento dos atuadores elétricos de cada articulação (Quadril e Joelho).

Com base nas informações lidas pelo o planejador de trajetória e para manter o controle da trajetória de forma adequada, foi utilizado o controlador PID para o controle dos atuadores elétricos. Para a sintonização dos ganhos K_p , K_i e K_d , aplicou-se o método de sintonia de Ziegler-Nichols. Através deste método, foi obtido o valor de 0.04 para o ganho crítico (K_{cr}) e 2400 para o período crítico (P_{cr}). Com os valores do ganho crítico e do período crítico, foi determinado os valores aproximados dos ganhos K_p e τ_i do controlador PID. Sendo assim, os valores dos ganhos para o controle do atuador do quadril, foram $K_p = 0.01$, $K_i = 0.00001$ e $K_d = 0$.

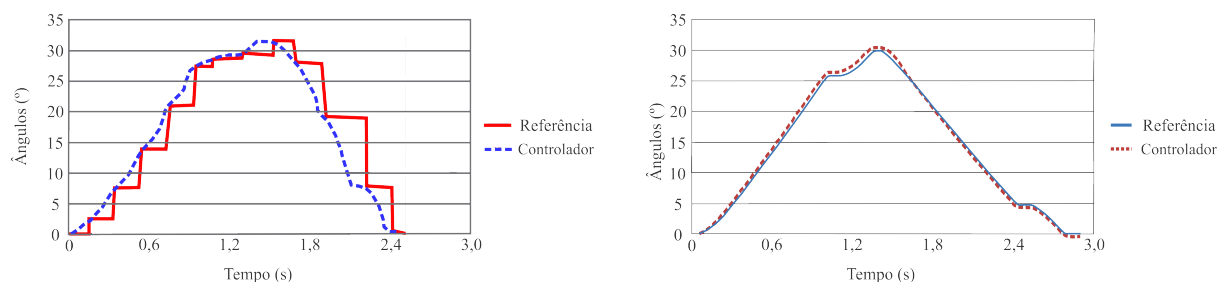


Figure 5. A) Resultado gerado pela arquitetura de controle do exoesqueleto Ortholeg 1.0 B) Resultado gerado pela arquitetura de controle do exoesqueleto Ortholeg 2.0.

5. Conclusão

Neste trabalho foi apresentado a arquitetura de controle da estrutura do exoesqueleto ortopédico para os membros inferiores Ortholeg 2.0. A inclusão de aspectos de movimentação autônoma como: a adaptação do ciclo de marcha e as referências adaptadas e personalizadas para cada usuário em particular, proporcionaram novos aspectos de transparência e marchas mais antropomórficas sem interação constante do usuário. Além disto, a sintonização do controlador PID através do método Ziegler-Nichols, possibilitou obter a execução da trajetória de uma forma mais estável e robusta.

Portanto, em trabalhos futuros, propõe-se desenvolver novos métodos de planejamento de movimento, assim como utilizar mecanismos de percepção robótica.

6. REFERÊNCIAS

- Araújo, M.V., Alsina, P.J., Medeiros, A.A.D., Araújo, F.M.U., Pinheiro, J.P., Domingos, E.C. and Silva, J.S., 2009. **“Development of an active orthosis prototype for lower limbs”**. In 20th International Congress of Mechanical Engineering. Gramado, Brazil.
- Arkin, R.C. (1987). **Towards Cosmopolitan Robots : Intelligent Navigation in Extended Man-made Environments**. PhD thesis, University of Massachusetts, Department of Computer and Information Science.
- Arkin, R.C. (1989). **Motor schema-based mobile robot navigation**. The international Journal of robotics Research, 4(8),92-112.
- Arruda, T. A. **“Arquitetura de Hardware e Software para Supervisão e Controle de um Carro Autônomo”**. 2012. 101 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)- Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.
- Carbonell, J. G., Knoblock, C. A., Minton, S. (1989). **PRODIGY: An Integrated Architecture for Planning and Learning**. Technical Report CMU-CS-89-189, CMU.
- Correia, L. and Steiger-Garcia, A. (1994). **“A model of hierarchical behavior control for an autonomous vehicle”**. In From Perception to Action Conference, 1994., Proceedings, pages 396–399.
- Eugenio, K.J.S. **“Implementação de arquitetura de hardware e software para uma órtese ativa para os membros inferiores Ortholeg”**. 2016. 44p. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Mecatrônica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.
- FARIA, G. **“Uma Arquitetura de Controle Inteligente para Múltiplos Robôs”**. 2006. 114 p. Tese de Doutorado (Doutorado em Ciências - Área de Ciências da Computação)- Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

- M. Gloger, P. J. Alsina and N. B. Melo, "**Ortholeg 2.0 - a new design for a lower limb active orthosis**", 2015 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS), Nagoya, 2015, pp. 1-7.
- Melo N. B., "**Geração de Trajetórias Angulares Para Articulações de Uma Órtese Ativa usando Modelagem de Caminhada**". 2017. 96p. Tese de Doutorado. (Engenharia Elétrica: Automação e Sistemas) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.
- Moraes, V.G.S; Araújo, M.V.; Alsina, P.J. "**Planejamento de Passadas Baseado no Comportamento Humano para uma Órtese Robótica de Membros Inferiores**". Encontro Nacional de Engenharia Biomecânica, Uberlândia, p. 1-5, maio. 2015.
- N. d. B. Melo, P. J. Alsina, C. E. T. Dórea and K. J. Da Silva Eugenio, "**Influence of different gait trajectories in an lower limb active orthosis performance based on user metabolic cost and motors usage**" 2015 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS), Nagoya, 2015, pp. 1-6.
- OGATA, Katsuhiko. "**Engenharia de Controle Moderno**". 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. 522 p.
- SILVEIRA, Luís Felipe et al. "**Relação entre a utilização da cinemetria interna e externa na análise da cinemática articular do joelho**". Salão de iniciação Científica (18.: 2006: Porto Alegre, RS). Livro de resumos. Porto Alegre: UFRGS, 2006.
- Widyotriatmo, A. and Hong, K.-S. (2008). "**Decision making framework for autonomous vehicle navigation**". In SICE Annual Conference, 2008, pages 1002–1007.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos órgãos governamentais CAPES e CNPq pelos auxílios financeiros.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.